

**С.М. МАЄВСЬКИЙ**, д-р техн.наук, проф. НТУУ «КПІ»  
**К.М. СЕРИЙ**, аспірант НТУУ «КПІ»

**БЕЗКОНТАКТНЕ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ  
ВИМІРЮВАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ДЕФЕКТОСКОПУ У  
ПРОЦЕСІ КОНТРОЛЮ.**

У роботі розглянуто ряд методів визначення координат вимірювального перетворювача в процесі сканування з метою підвищення точності визначення місцезнаходження перетворювачів відносно поверхні контролю, що в свою чергу підвищує надійність знаходження дефектів.

In work are considered a number of methods of definition of co-ordinates of the measuring converter in the course of scanning for the purpose of increase in accuracy of definition of a site of converters concerning the control area that in turn raises reliability of detection of defects.

**Вступ.** В епоху повної автоматизації технологічних процесів у всьому світі продовжують виробляти та експлуатувати такі засоби неруйнівного контролю, як дефектоскопи. Сучасні дефектоскопи - це досить складна техніка з автоматичною обробкою результату вимірювання, візуалізацією результату контролю і багатьма іншими виконуваними автоматично процесами. Проте дефектоскоп залишається засобом контролю у руках людини (дефектоскопіста), яка своїми органами зору (інколи – слуху) сприймає представлену системою індикаторів дефектоскопу інформацію і виносить рішення про результат контролю.

Суб'єктивність інформації отриманої від дефектоскопіста та відсутність координатного запису процесу сканування з відображенням просторового положення місць виявлених дефектів, що не дозволяє об'єктивно виконувати подальший моніторинг об'єктів контролю, всі ці недоліки привели до поступової заміни традиційних дефектоскопів набагато дорожчими автоматизованими системами контролю в ряді галузей таких, як авіакосмічна та енергетична техніки.

Для збереження дефектоскопів в експлуатації достатньо вирішити наступну проблему: незалежну від дефектоскопіста комп'ютерну реєстрацію вихідного сигналу дефектоскопу у координатах сканування поверхні об'єкту контролю вимірювальним перетворювачем. Тільки у цьому випадку результат контролю стане об'єктивним і буде основою для моніторингу об'єкту контролю.

Проблема координатної реєстрації сигналів дефектоскопів не є новою для техніки неруйнівного контролю. Ряд фірм – виробників дефектоскопічної апаратури пропонують використовувати спеціальні механічні вимірювальні системи, які діючи в механічному контакті з вимірювальним перетворювачем визначають відносні кутові та лінійні параметри положення цього

перетворювача. Кодуючи з заданою частотою вихідні сигнали дефектоскопу маємо можливість запису коду сигналу разом з лінійними координатами положення вимірювального перетворювача дефектоскопу у процесі сканування ділянки поверхні об'єкту контролю.

Основним недоліком механічних систем координатування крім певних незручностей роботи з ними дефектоскопіста є те, що ці системи придатні лише для визначення двохмірних координат при скануванні плоских поверхонь об'єктів. Необхідні безконтактні дистанційні системи визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопу розраховані на порівняно невеликі ( $1 \text{ м}^2$ ) розміри поверхні сканування.

Ультразвуковий метод безконтактного визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопу у процесі сканування плоскої поверхні об'єкту контролю. Нами досліджені ряд методів вирішення проблеми визначення координат вимірювального перетворювача в процесі сканування [1,2]. В даній статті наводимо деякі результати дослідження методу, який передбачає використання ультразвукових (40 кГц) коливань для дистанційного (до 1,5 м) визначення згаданих координат у системі відліків, яка відтворюється розташуванням системи акустичних приймачів.

Ультразвуковий метод вирішення згаданої проблеми полягає у періодичному випромінюванні акустичних коливань відповідним ненаправленим збудником ультразвукових коливань у повітрі, розташованим на поверхні вимірювального перетворювача дефектоскопу, та прийомі цих коливань двома приймачами, які розташовуються на кінцях бази вимірювань рівної, наприклад, одному метру (рис.1). Частота збуджених коливань може становити до 50 кГц з умови мінімального їх затухання при довжині розповсюдження у повітрі до двох метрів.

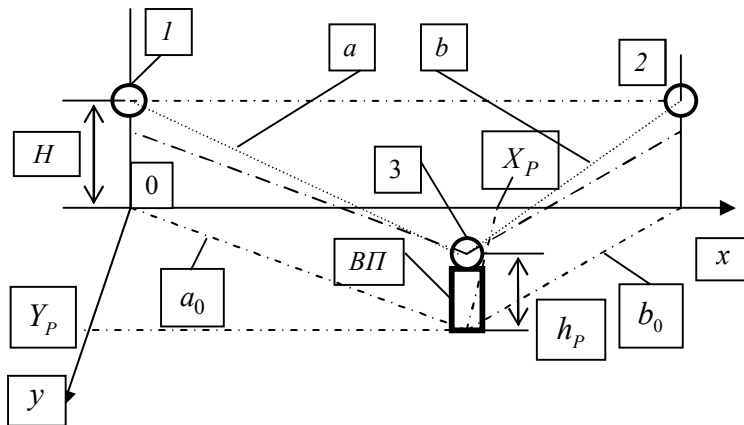


Рис.1. Схема визначення просторових координат вимірювального перетворювача ВП акустичним методом.

Короткий радіоімпульс акустичних коливань частоти 40 кГц ненаправлено випромінюється точковим збудником 3, який встановлений на вершині корпусу вимірювального перетворювача (ВП). Ці коливання приймаються акустичними приймачами 1,2 з затримками  $\tau_a, \tau_b$  відповідно пройденим відстаням  $a, b$ . Затримки вимірюються шляхом формування та наступного кодування відповідних їм часових інтервалів, початком яких є момент збудження радіоімпульсних коливань, а кінцем – момент їхнього надходження до відповідного приймача коливань.

Таким чином значення відстаней  $a, b$  становлять:

$$a = \tau_a \cdot C_{II}; \quad b = \tau_b \cdot C_{II}; \quad (1)$$

де  $C_{II}$  – швидкість розповсюдження акустичних коливань у повітрі, яка визначається в залежності від температури повітря за наступною формулою [3]:

$$C_{II} = 331,6 + 0,6 \cdot t^0C$$

Для визначення координат  $X, Y$  положення вимірювального перетворювача необхідно спочатку визначити проекції прямих  $a, b$  на площину  $Oxy$ , які відповідають відповідно лініям  $a_0$  та  $b_0$ , що з'єднують горизонтальну проекцію вимірювального перетворювача ВП з початком координат та кінцем бази вимірювання  $B$  (відстанню між приймачами коливань 1 та 2):

$$\begin{aligned} a_0^2 &= a^2 - (H - h_p)^2 \\ b_0^2 &= b^2 - (H - h_p)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

де  $h_p$  - висота корпусу вимірювального перетворювача.

Для визначення координат власне вимірювального перетворювача  $X_p, Y_p$  згідно рис. 1 запишемо їх значення через визначені  $a_0, b_0$  та встановлене значення бази вимірювань  $B$ :

$$\begin{aligned} X_p^2 &= a_0^2 - Y_p^2 \\ X_p^2 &= b_0^2 - (B - Y_p)^2 \end{aligned} \quad (3)$$

Прирівнюємо праві частини рівнянь і визначаємо ординату  $Y_p$ :

$$Y_P = \frac{a_0^2 - b_0^2 + B^2}{2B} = \frac{a^2 - b^2 + B^2}{2B} \quad (4)$$

Підставляємо (2) в (3) і визначаємо абсцису  $X_P$ :

$$X_P = \sqrt{a_0^2 - \left( \frac{a^2 - b^2 + B^2}{2B} \right)^2} = \sqrt{a^2 - (H - h_P)^2 - \left[ \frac{a^2 - b^2 + B^2}{2B} \right]^2} \quad (5)$$

Враховуючи (1) запишемо остаточні вирази для розрахунків значень координат:

$$X_P = \sqrt{\tau_a^2 C_{II}^2 - (H - h_P)^2 - \left[ \frac{(\tau_a^2 - \tau_b^2) \cdot C_{II}^2 + B^2}{2B} \right]^2} \quad (6)$$

$$Y_P = \frac{(\tau_a^2 - \tau_b^2) \cdot C_{II}^2 + B^2}{2B}$$

Безконтактна акустична система визначення просторових координат положення вимірювального перетворювача дефектоскопу в процесі контролю. При виконанні неруйнівного контролю з допомогою традиційних дефектоскопів виробів та елементів конструкцій з складною розвинутою в трьохмірному просторі поверхнею необхідно визначати всі три координати миттєвого положення вимірювального перетворювача. Навіть при контролі виробів з плоскою поверхнею з допомогою високочастотних (>1 МГц) вихрострумових дефектоскопів, для вимірювальних перетворювачів яких допускається нахил вісі до 15 – 20 градусів відносно нормалі до поверхні об'єкту контролю, дистанційне визначення координат можливе тільки при використанні трьохмірної системи.

Нами розроблена система визначення координат для такого випадку. Принцип роботи такої системи показаний на рис. 2. Відмінністю цієї системи від попередньої полягає в тому, що використовується два збудники ультразвукових коливань, які розміщені на осі перетворювача. Відстань між збудними коливань становить  $l$ , а верхнього збудника відносно власне вимірювального перетворювача -  $L$ . Крім того використовуються три приймачі коливань 1, 2 і 3 розміщені згідно рис. 2 на кінцях бази вимірювань.

Для визначення координат вимірювального перетворювача спочатку визначаємо просторове положення його вісі за координатами двох точок – збудників коливань  $A, D$  і лише потім визначаємо координати третьої точки на прямій – вимірювального перетворювача за відомими відстанями між ним та двома збудниками коливань.

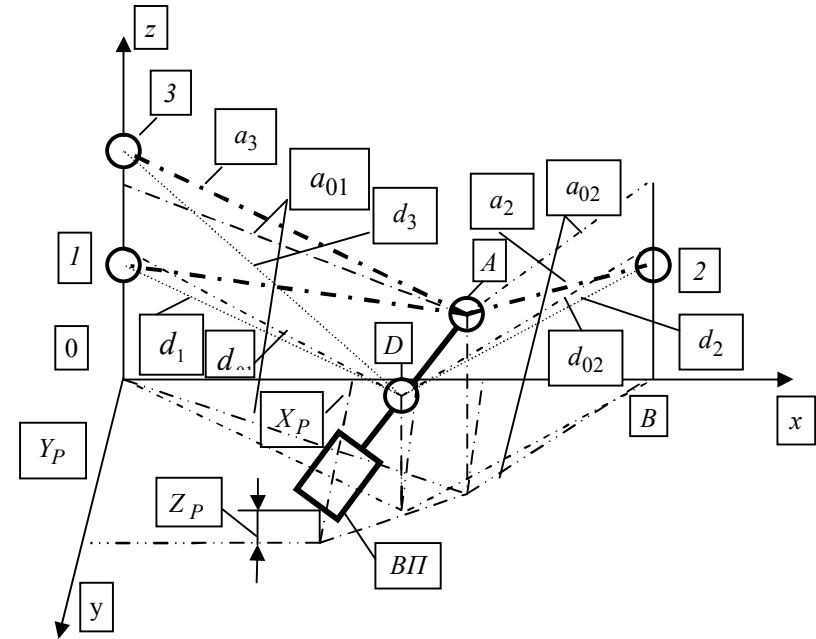


Рис. 2. Схема вимірювання просторових координат вимірювального перетворювача при контролі об'єктів з складною поверхнею.

Два збудника акустичних (40 кГц) коливань  $A$  і  $D$  періодично і по чергові випромінюють радіоімпульс ультразвукових коливань при збудженні кожного з них імпульсом напруги. Частоту збудження цих перетворювачів визначаємо виходячи з максимальної швидкості сканування та допустимої динамічної похибки визначення координат. Задамося значенням допустимої динамічної похибки  $\Delta_{дин} = \pm 0,5$  мм при максимальній швидкості сканування 20 мм/с. Тоді період вимірювання значення координат має складати 0,025 с і за цей час мають відбутися обидві операції вимірювання часових запізень ультразвукових сигналів, що збуджуються збудниками  $A$  і  $D$  та приймаються акустичними приймачами 1, 2 і 3.

Нехай максимальна відстань між любым із збудників коливань і приймачем становить 1,5 м. Час запізнення ультразвукового сигналу на цій дистанції становить  $\tau_{max} = 1,5m / 343,5m/c = 4,3 \cdot 10^{-3} c$ , що значно менше за половину визначеного вище періоду вимірювань ( 12,5 мс).

Таким чином, вимірювання координат збудників коливань  $A$  та  $D$  при періодичному підключенні до них імпульсів напруги будемо виконувати

шляхом вимірювання затримок  $\tau_{A1}, \tau_{A2}, \tau_{A3}$  та  $\tau_{D1}, \tau_{D2}, \tau_{D3}$  збуджених коливань на шляху їх розповсюдження відповідно  $a_1, a_2, a_3$  та  $d_1, d_2, d_3$  при прийомі цих коливань приймачами 1, 2 та 3. Значення  $a_1, a_2, a_3$  та  $d_1, d_2, d_3$  відповідає результату перемноження відповідних затримок  $\tau_{A1}, \tau_{A2}, \tau_{A3}$  та  $\tau_{D1}, \tau_{D2}, \tau_{D3}$  на величину швидкості розповсюдження ультразвуку частоти 40 кГц у повітрі.

Значенню перпендикуляра з точки  $A$  на вісь  $Oz$  -  $a_{10}$  відповідають рівняння:

$$\begin{aligned} a_{10}^2 &= a_3^2 - (2H - Z_A)^2, \\ a_{10}^2 &= a_1^2 - (Z_A - H)^2. \end{aligned} \quad (7)$$

Звідсіля значення координата  $Z_A$  збудника коливань  $A$  становить:

$$Z_A = \frac{a_1^2 - a_3^2 + 3H^2}{2H} \quad (8)$$

На основі значення координати  $Z_A$  визначаємо довжини перпендикуляра  $a_{20}$ :

$$a_{20}^2 = a_2^2 - (Z_A - H)^2 \quad (9)$$

Для знаходження координат  $X_A, Y_A$  використовуємо (7,8) та (9):

$$\begin{aligned} X_A &= \frac{a_1^2 - a_2^2 + B^2}{2B}, \\ Y_A &= \sqrt{a_1^2 - \left( \frac{a_1^2 - a_3^2 + H^2}{2H} \right)^2 - \left( \frac{a_1^2 - a_2^2 + B^2}{2B} \right)^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Аналогічно знаходимо координати збудника коливань  $D$ :

$$\begin{aligned} X_D &= \frac{d_1^2 - d_2^2 + B^2}{2B}, \\ Y_D &= \sqrt{d_1^2 - \left( \frac{d_1^2 - d_3^2 + H^2}{2H} \right)^2 - \left( \frac{d_1^2 - d_2^2 + B^2}{2B} \right)^2}, \\ Z_D &= \frac{d_1^2 - d_3^2 + 3H^2}{2H}. \end{aligned} \quad (11)$$

Після того, як визначені координати просторового розташування кожного з двох збудників ультразвукових коливань, можемо розрахувати координату третьої точки на прямій – власне вимірювального перетворювача. Для цього достатньо використати рівняння прямої, що з'єднує всі три точки з відомими відстанями між ними:

$$\begin{aligned} X_P &= \frac{LX_D - (L-l)X_A}{l}, \\ Y_P &= \frac{LY_D - (L-l)Y_A}{l}, \\ Z_P &= \frac{LZ_D - (L-l)Z_A}{l}. \end{aligned} \quad (12)$$

Представимо отримані вирази для розрахунків значень координат просторового положення вимірювального перетворювача дефектоскопу у кінцевому вигляді (у залежності від значень часових затримок):

$$X_P = \frac{L[(\tau_{d1}^2 - \tau_{d2}^2)C_{II}^2 + B^2] - (L-l)[(\tau_{a1}^2 - \tau_{a2}^2)C_{II}^2 + B^2]}{2Bl} \quad (13)$$

$$Y_P = \frac{\left\{ L\sqrt{4B^2H^2\tau_{d1}^2C_{II}^2 - B^2[(\tau_{d1}^2 - \tau_{d3}^2)C_{II}^2 + H^2]^2} - H^2[(\tau_{d1}^2 - \tau_{d2}^2)C_{II}^2 + B^2]^2 - \right.}{2BHI} \left. \left\{ (L-l)\sqrt{4B^2H^2\tau_{a1}^2C_{II}^2 - B^2[(\tau_{a1}^2 - \tau_{a3}^2)C_{II}^2 + H^2]^2} - H^2[(\tau_{a1}^2 - \tau_{a2}^2)C_{II}^2 + B^2]^2 \right\} \right\} \quad (14)$$

$$Z_P = \frac{L[(\tau_{d1}^2 - \tau_{d3}^2)C_{II}^2 + 3H^2] - (L-l)[(\tau_{a1}^2 - \tau_{a2}^2)C_{II}^2 + 3H^2]}{2HI} \quad (15)$$

**Висновок.** На основі приведених міркувань та отриманих рівнянь для розрахунків координат зробимо ряд висновків:

1. На точність визначення координат положення вимірювального перетворювача, який рукою дефектоскопіста сканує поверхню об'єкту контролю, не впливає температурна залежність швидкості розповсюдження акустичних коливань у повітрі (зміна швидкості приводить до зворотної зміни величини часової затримки);

2. Недоліком даного методу є вплив на результат вимірювання відстаней руху повітря. Рух повітря у зоні розповсюдження ультразвукових коливань приводить до суттєвої зміни акустичної швидкості. Так швидкість вітру чи протягу 2 м/с у напрямці розповсюдження ультразвукових коливань вносить похибку визначення відстані довжиною 1 м рівну 0,7%, що в абсолютному

виміру становить 7 мм. В польових умовах контролю з використанням системи реєстрації координат сканування усунення впливу вітру можемо досягти застосуванням полотняного накриття або намету.

3. Збудження і прийом коливань частотою приблизно 40 кГц можемо виконати з допомогою серійних перетворювачів, наприклад з допомогою п'єзоперетворювача Модель 4075 фірми Parsonics Corp. (США), перетворювача УП-1 (РФ);

4. Недоліком п'єзоелектричних ультразвукових (40 кГц) перетворювачів є недостатньо широка діаграма направленості ( $75^0$ ). Тому збудник коливань повинен мати у своєму складі не менше двох подібних паралельно включених перетворювачів так, щоб утворити сумарну діаграму направленості не менше  $150^0$ ;

5. За рахунок реальної часової довжини затухаючих коливань при збудженні п'єзоперетворювача подачею на його обкладинки імпульса напруги має місце «мертва зона» [4] довжиною (4 -5) довжин хвиль коливання у повітрі, що становить для частоти 40 кГц (35-43) мм. Ця зона враховується розмірами трафарету у складі конструкції, на якій розміщуються приймачі коливань.

6. Реальна точність визначення координат вимірювального перетворювача дефектоскопу при максимальній відстані між вимірювальним перетворювачем і одним з приймачів коливань в 1,5 м не перевищує 1,5 мм.

**Список літератури:** 1. *С.М.Маєвський, К.М.Серий.* Системи дистанційного визначення просторового положення вимірювального перетворювача дефектоскопу в процесі контролю. Методи та прилади контролю якості №9 ІваноФранківськ 2002 стр.14-17. 2. *С.М.Маєвський, К.М.Серий.* Автоматизація визначення координат для документування результатів контролю при ручному скануванні. Матеріали науково-технічної конференції «Приладобудування. Стан і перспективи» НТУУ «КПІ» м.Київ 2003 стр.22-24. 3. *Х.Кухлинг.* Справочник по физике. М. «Мир» 1982 (рос) стр.254. 4. Неразрушающий контроль. Книга 2. Акустический метод контроля. Под редакцией В.В.Сухорукова. М. «ВШ» 1991 (рос) стр.75-92